

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 623.54:681.5:004.421

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-50-61

### Стрелковый тренажер «Ингибитор»: программное обеспечение баллистики оружия калибра 5,45

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент,  
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия  
А. Ю. Вдовин, кандидат технических наук, доцент,  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия  
Ю. К. Шелковников, доктор технических наук, профессор,  
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

*Описывается программное обеспечение поддержки расчета внешней баллистики для оружия калибра 5,45 мм с учетом внешних факторов тактического тренажера оптико-электронного для стрелкового оружия «Ингибитор», разработанного в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН и на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с АО «Концерн «Калашников».*

*Приводится тактико-техническое задание для баллистического расчета траектории до 2 км дальности имитаторов оружия с лазерным излучателем точки прицеливания с учетом внешних факторов: положения прицельной планки всех видов прицелов, температуры и давления воздуха, которые оказывают существенное влияние на сопротивление воздуха. Реализованная дифференциальная математическая модель внешней баллистики, опираясь на угол прицеливания имитатора оружия, начальную скорость и баллистический коэффициент боеприпаса в реальном времени, строит баллистическую траекторию с поправками на температуру и давление воздуха. Приводятся результаты испытаний программного обеспечения на погрешность расчета координат баллистической траектории.*

*Сделан вывод о перспективности дальнейших исследований и разработке электронных стрелковых тренажеров благодаря совершенствованию и удешевлению элементной базы и развитию программных библиотек с целью повышения точности имитации внешней баллистики тренажеров с учетом многих внешних факторов, расширения функциональных возможностей и снижения себестоимости и, значит, повышения конкурентоспособности.*

**Ключевые слова:** стрелковый тренажер, внешняя баллистика, математическая модель, теория поправок, баллистическая траектория, интегрирование.

#### Введение

Разработка электронных стрелковых тренажеров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) [1–11] и электронных мишеней (использующих боеприпасы) [12–15] является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам, требует и производства тренажера для привития навыков прицеливания и стрельбы, а также мишеней-тиров или стрельбищ в качестве боевых тренажеров и испытательных стендов для исследования и совершенствования конструкции изделий [16–22]. Тренажер может быть просто механической насадкой на боевое изделие (например, командирский ящик КЯ-83), но электронные тренажеры или мишени, безусловно, обладают большими функциональными возможностями.

Стрелковый тренажер «Ингибитор» разрабатывался и модифицировался в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН и на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с АО «Концерн «Калашников» с 2000 по 2010 год и принят на вооружение под индексом 1У33 [23–26]. Работки в настоящее время используются для следующего семейства тренажеров [27].

Целью статьи является описание разработки и испытания математической модели баллистического движения в программном обеспечении тактического тренажера оптико-электронного для стрелкового оружия «Ингибитор» (по теме программного обеспечения тренажера ожидается 13–15 статей за 2019–2023 гг.).

#### Тактико-техническое задание

Требования ТТЗ (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале за 2019 г.) к имитации балли-

стики оружия калибра 5.45 тренажера (а это стрелковое вооружение АК-74 и РПК-74 с ночными прицелами (см. работу С. Ф. Егорова, Н. И. Осипова, С. Р. Кизнерцева в этом журнале за 2019 г.) сводятся к определению точек попадания (ТП) с учетом баллистики конкретных имитаторов оружия (ИО) и типов боеприпасов и их рассеивания, угла места цели, метеоусловий (температуры и давления воздуха, силы, направления и даже порывов ветра), еще, естественно, установок прицела (механического или ночного) и точек прицеливания (ТПр) и даже порядка выстрела в очереди. При этом моделирование координат траектории должно опираться на табл. 1–3 из наставления

на АК-74 и РПК-74, а погрешность координат не должна превышать 0,3 т. д. (тысячных дальности).

Таким образом, основной целью расчета внешней баллистики имитаторов оружия калибра 5,45 является определение возвышения пули и время ее пролета до каждой из дальностей с учетом внешних факторов (температура и давление) для дальнейшего решения «задачи встречи» с препятствием (целью-мишенью, местным предметом, рельефом) на каждом шаге дистанции и отрисовки спецэффектов (транслирующих боеприпасов, разрывов, попаданий и т. п.).

Таблица 1. Параметры траектории АК-74 от дальности

Дальность	Угол прицеливания		Угол падения		Высота тр-ии	Дальность до вершины траектории	Время полета	Конечная скорость	Энергия у падения
	град, мин	тыс.	град, мин	тыс.					
100	0 08	2,2	0 02	0,6	0,02	51	0,12	801	111
200	0 10	2,8	0 06	1,7	0,08	104	0,25	709	87
300	0 13	3,6	0 10	2,8	0,20	159	0,39	623	67
400	0 16	4,4	0 16	4,4	0,40	217	0,57	543	51
500	0 20	5,5	0 25	6,9	0,74	277	0,77	467	38
600	0 26	7,2	0 38	11	1,3	341	1,01	397	26
700	0 34	9,4	0 57	16	2,1	407	1,29	340	20
800	0 43	12	1 21	23	3,3	476	1,60	306	16
900	0 54	15	1 49	30	4,9	543	1,94	285	14
1000	1 07	19	2 20	39	7,1	608	2,34	267	12

Вес пули 3,4 г, дульная энергия 140 кгм, начальная скорость 900 м/с, угол вылета минус 4 мин

Дальность	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	Прицел	Сантиметры превышения										
1	0	0	-3	-10								
2	3	5	5	0	-10	-25						
3	6	13	17	16	11	0	-17	-43				
4	11	24	33	38	37	32	20	0	-27	-65		
5	18	37	53	64	70	71	65	52	31	0	-42	-98
Дальность	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
	Прицел	Метры превышения										
6	0,54	0,97	1,2	1,2	0,82	0	-1,5	-3,7				
7	0,75	1,4	1,8	2,0	1,9	1,3	0	-2,1	-5,2			
8	1,0	1,9	2,7	3,1	3,2	2,9	1,9	0	-2,9	-7,0		
9	1,4	2,2	3,6	4,4	4,8	4,8	4,1	2,6	0	-3,8	-8,9	
10	1,7	3,3	4,8	5,9	6,7	7,1	6,8	5,6	3,4	0	-4,8	-11,1

Таблица 2. Параметры траектории РПК-74 от дальности

Дальность	Угол прицеливания		Угол падения		Высота тр-ии	Дальность до вершины траектории	Время полета	Конечная скорость	Энергия у падения
	м	град, мин	тыс.	град, мин					
100	0 06	1,7	0 02	0,6	0,02	51	0,11	857	127
200	0 07	1,9	0 05	1,4	0,07	104	0,23	760	100
300	0 10	2,8	0 09	2,5	0,17	159	0,37	671	78
400	0 13	3,6	0 14	3,9	0,35	216	0,53	588	60
500	0 16	4,4	0 22	6,1	0,63	276	0,72	510	45
600	0 21	5,8	0 32	8,9	1,07	339	0,93	437	33
700	0 27	7,5	0 47	13,1	1,73	405	1,18	372	24
800	0 35	9,7	1 09	19,2	2,73	474	1,48	323	18
900	0 44	12,2	1 34	26,1	4,15	544	1,80	298	15
1000	0 56	15,5	2 03	34,2	6,06	612	2,15	279	13

Вес пули 3,4 г, дульная энергия пули 160 кгм, начальная скорость 960 м/с, угол вылета минус 2 мин

Дальность	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	Прицел	Сантиметры превышения										
1	0	0	-2	-8								
2	3	4	4	0	-8	-21						
3	9	11	15	14	9	0	-14	-36				
4	11	20	28	32	32	27	16	0	-23	-53		
5	15	31	45	54	60	60	58	44	26	0	-37	-86
Дальность	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Прицел	Метры превышения											
6	0,46	0,83	1,02	1,00	0,69	0	-1,20	-3,13				
7	0,63	1,18	1,55	1,70	1,57	1,04	0	-1,76	-4,44			
8	0,86	1,63	2,23	2,61	2,69	2,39	1,55	0	-2,47	-6,07		
9	1,13	2,18	3,06	3,71	4,07	4,04	3,49	2,21	0	-3,30	-7,9	
10	1,47	2,84	4,06	5,03	5,72	6,03	5,80	4,86	2,97	0	-4,26	-9,94

Таблица 3. Параметры рассеивания и поправок на боковой ветер и атмосферу

Дальность, м	Срединные отклонения рассеивания, см								Поправки на отклонение на боковой ветер (4 м/с), м	Поправки по высоте на температуру на 10 °С, м	Поправки по высоте на давление на 10 мм рт. ст., м			
	первых пуль очередей				последующих пуль очередей									
	по высоте		боковое		по высоте		боковое							
	Вв <sub>1</sub>	Вб <sub>1</sub>	Вв	Вб										
АК-74	РПК-74	АК-74	РПК-74	АК-74	РПК-74	АК-74	РПК-74	АК-74	РПК-74	АК-74	РПК-74	АК-74	РПК-74	
100	4	3	2	3	3	4	4	4	0,03	0,02	0	0	0	0
200	8	6	4	6	6	8	8	8	0,11	0,10	0,01	0,01	0	0
300	12	9	6	9	9	12	12	12	0,23	0,23	0,02	0,02	0	0
400	16	12	8	12	12	16	16	16	0,52	0,46	0,04	0,03	0,01	0,01
500	20	15	10	15	15	20	20	20	0,87	0,78	0,08	0,07	0,02	0,02
600	24	18	12	18	18	24	24	24	1,34	1,22	0,16	0,13	0,04	0,03
700	29	22	14	21	22	29	28	28	2,03	1,81	0,28	0,22	0,07	0,06
800	34	26	17	24	26	34	32	32	2,86	2,57	0,47	0,37	0,13	0,11
900	39	31	20	28	31	39	37	36	3,77	3,44	0,73	0,61	0,20	0,18
1000	46	37	23	32	37	45	42	41	4,92	4,42	1,07	0,92	0,30	0,27

В данной статье рассматривается только математическая модель баллистики с учетом метеоусловий (температуры и давления воздуха) на базе дифференциальных уравнений и методы ее решения с оценкой погрешностей.

#### Математическая модель внешней баллистики

В рамках разумных допущений для локальной баллистики и исходя из ТТЗ на тренажере о поддержке дальности целей до 2 км с углом видимости  $60^\circ$  по горизонтали и до  $40^\circ$  по вертикали (а реальные стрелковые упражнения не превышают дальность 800 м и высоту не более 200 м) в математической модели не учитываются следующие внешние факторы:

1. Кривизна и вращение земли игнорируются, ускорение свободного падения  $g$  выбрано для параллели  $55^\circ$  и постоянно  $g_c=9,815 \text{ м/с}^2$ .
2. Влияние прецессии, нутации и деривации пули игнорируются (точнее, включены в баллистическое рассеивание), только движение центра массы.
3. Игнорируется изменение температуры и давления воздуха по высоте баллистической траектории и постоянны на время одного вы-

стрела, а стандартные значения  $T_c=288 \text{ К}$  ( $15^\circ \text{C}$ ) и  $p_c=760 \text{ мм рт. ст.}$

4. Влияние восходящих и встречных потоков воздуха игнорируется – учитывается только строго боковая составляющая ветра с порывами (случайные изменения скорости) на каждом шаге расчета траектории.

На баллистику влияют только следующие факторы (по важности из ТТЗ):

1. Типы ИО и боеприпаса учитывается через начальную скорость  $v_0$  и баллистический коэффициент пули  $c$  – зависит от ее формы и массы (табл. 4), у калибра 5,45 есть еще трассирующие боеприпасы с теми же параметрами.
2. Угол бросания  $\theta_0$  (угол возвышения минус угол вылета, рис. 1) определяется через угол прицеливания для конкретных показаний прицелов дальности ИО (а их 10 для калибра 5,45) из табл. 4 и через угол места цели по ТПР (см. работу С. Ф. Егорова, И. Г. Корнилова, Ю. К. Шелковникова, С. Р. Кизнерцева, И. В. Коробейниковой, Е. М. Маркова в этом журнале за 2020 г.).

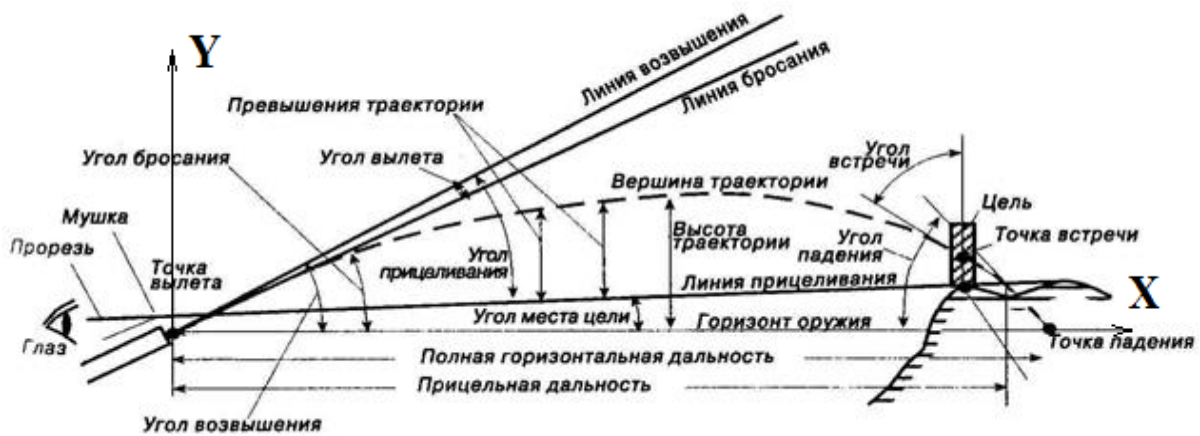


Рис. 1. Баллистическая траектория

3. Температура воздуха  $T$ , которая оказывает существенное влияние на сопротивление воздуха пуле, учитывается через текущую скорость звука  $a$ , через начальную скорость пули (зависит от температуры порохового заряда) и через теорию поправок.

4. Давление воздуха  $p$ , которое оказывает влияние на сопротивление воздуха, учитывается через текущую скорость звука  $a$  и через теорию поправок.

5. Ветер боковой с порывами  $W$ , учитывается через теорию поправок траектории по отдельной математической модели на каждом

шаге для учета порывов - постоянного случайного изменения силы до заданного значения.

6. Баллистическое рассеивание боеприпасов  $\sigma$  (с.к.о.) учитывается по данным табл. 3  $\sigma = 1,493E$  – верхнее и боковое и от порядка выстрела в очереди.

В данной статье не рассматривается вопрос определения угла места цели, отклонения от бокового ветра, решение «задачи встречи» и не учитывается баллистическое рассеивание (планируется в следующих статьях цикла).

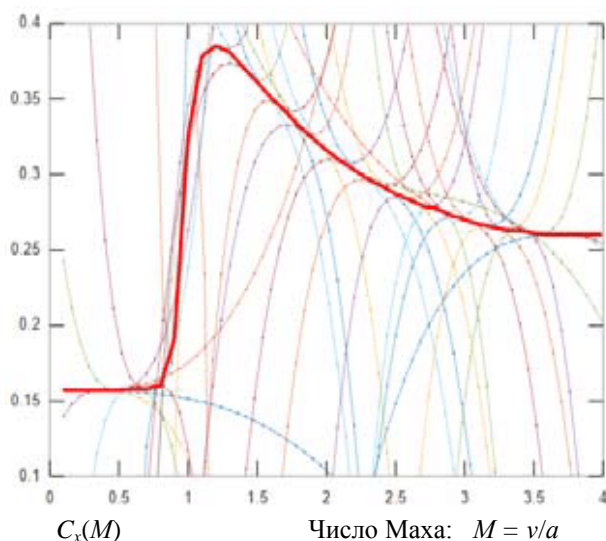
Таблица 4. Параметры баллистики стрелкового вооружения 5,45

ИО	$v_0$ , м/с	$c_x$ , м <sup>2</sup> /кг	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$
АК-74	900	8,65	2'16"	4'55"	8'06"	11'55"	16'37"	22'26"	29'46"	38'56"	50'08"	63'18"
РПК-74	960	8,55	1'59"	4'18"	7'03"	10'19"	14'18"	19'11"	25'16"	32'56"	42'28"	53'55"

За основу математической модели внешней баллистики взяты системы дифференциальных уравнений [28] по координате дальности  $x$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -c_1 \Delta(y) v C_x(v/a); \\ \frac{d\gamma}{dx} &= -\frac{g}{u^2}; \\ \frac{dy}{dx} &= \gamma = \operatorname{tg}\theta; \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{u}; \\ v &= u\sqrt{1+\gamma^2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $y, x$  – координаты центра массы пули;  $a$  – скорость звука;  $c_1$  – коэффициент сопротивления ( $c_1 = 0,00048104c_x$ );  $u = v \cos \theta$  – проекция скорости  $v$  на ось  $X$ ;  $\Delta(y) = 1$  (для настильных траекторий);  $t$  – время движения пули по траектории;  $\gamma = \operatorname{tg}\theta$  – тангенс угла  $\theta$  вектора скорости;  $g$  – ускорение свободного падения ( $9.815 \text{ м/с}^2$ );  $C_x(v/a)$  – лобовое сопротивление воздуха по закону 1943 года (рис. 2), аппроксимируется таблично, например, кусочно-непрерывными функциями от  $M = v/a$  – числа Маха (табл. 5) [29].

Рис. 2.  $C_x(M)$  по закону 1943 годаТаблица 5. Аппроксимация  $C_x(M)$ 

$M = v/a$	$C_x(M)$
$[0...0,73[$	0,157
$[0,73...0,82[$	$0,033M + 0,133$
$[0,82...0,91[$	$0,161 + 3,9(M - 0,823)^2$
$[0,91...1,00[$	$1,5M - 1,176$
$[1,00...1,18[$	$0,384 - 1,6(M - 1,176)^2$
$[1,18...1,62[$	$0,384 \sin(1,85/M)$
$[1,62...3,06[$	$0,29/M + 0,172$
$[3,06...3,53[$	$0,301 - 0,011M$

Важной характеристикой пули является баллистический коэффициент  $c$ :

$$c = i_{43} \frac{d^2}{q} 1000,$$

где  $d$  – калибр пули (м),  $q$  – вес пули (кг),  $i_{43}$  – коэффициент формы ( $0,8...1,4$  – определяется экспериментально, в общем случае зависит от  $v$  и  $\theta$ ). Для пули со стальным сердечником калибра 5,45 и весом 3,4 г  $c \approx 8,6 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Экспериментальный подбор  $i_{43}$  осуществляется в программе моделирования баллистики, добиваясь соответствия табличным значениям времени подлета пули к рубежам дальности (табл. 1, 2). Потом, рассчитав  $c$  по  $i_{43}$ , в программе подбирается уже угол бросания  $\theta_i$  для каждой дальности прицела, добиваясь нулевого возвышения ТП на этой дальности [30]. Так и сформирована табл. 4.

Атмосферные факторы влияют на скорость звука в воздухе  $a$  (для  $T_c = 288$  и  $p_c = 760$   $a_c = 340,4 \text{ м/с}$ ) – составляющей  $C_x(v/a)$ , которая существенно зависит от температуры ( $T$ , К) и незначительно от давления ( $p$ , мм рт. ст.) и еще от температуры порохового заряда зависит начальная скорость пули  $v_0$ :

$$a = \sqrt{p * 144,5372} \sqrt{\frac{T}{273}}, \quad \Delta v_0 = v_0 * 0,000638 \Delta T.$$

Далее, на основе закона подобия Ланжевена [31] в математическую модель (1) вводятся поправки на температуру  $T$  и давление  $p$  воздуха. И после определения начальных данных  $c$ ,  $v_0$ ,  $\theta$  из табл. 4 по типу ИО и показаниям прицела (1–10), а по ним  $c_2$  и  $v$  с учетом  $T$  и  $p$  по (2), решается система (3). Результаты интегрирования  $x$ ,  $y$ ,  $t$ ,  $v$  пересчитываются по (4).

$$c, v_0, \theta \text{ из табл. 4; } c_2 = 0,00048104c \frac{P}{p_c}; \quad v = v_0(1 + 0,000638(T - T_c))\sqrt{\frac{T_c}{T}}; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -c_2 v C_x \left( \frac{v}{a_c} \right); & \frac{d\gamma}{dx} &= -\frac{g}{u^2}; & \frac{dy}{dx} &= \gamma = \operatorname{tg}\theta; & \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{u}; & v &= u\sqrt{1 + \gamma^2} \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

$$x_{\text{реал}} = x \frac{T}{T_c}; \quad y_{\text{реал}} = y \frac{T}{T_c}; \quad t_{\text{реал}} = t \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad v_{\text{реал}} = v \sqrt{\frac{T}{T_c}}. \quad (4)$$

Для решения системы дифференциальных уравнений математической модели (3) настильных траекторий используются методы Рунге – Кутты и Мильна [32]. Использование метода Мильна позволяет сократить количество вычислений на каждом шаге интегрирова-

ния и добиться большей точности, но для его использования необходимо получить значения параметров в трех начальных точках уже методом Рунге – Кутты с шагом  $h$  (подбирается экспериментально).

Цикл интегрирования Рунге – Кутты:

$$\left. \begin{aligned} u_{11} &= u_n + hu_n'; & u_n' &= -c_2 v_n C_x \left( \frac{v_n}{a_c} \right); & u_{12} &= u_n + hu_{11}'; & u_{11}' &= -c_2 v_{11} C_x \left( \frac{v_{11}}{a_c} \right); \\ \gamma_{11} &= \gamma_n - \frac{hg}{u_n^2}; & v_n &= u_n \sqrt{1 + \gamma_n^2}; & \gamma_{12} &= \gamma_n - \frac{hg}{u_{11}^2}; & v_{11} &= u_{11} \sqrt{1 + \gamma_{11}^2}; \\ y_{11} &= y_n + h\gamma_n; & & & y_{12} &= y_n + h\gamma_{11}; & & \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{21} &= u_n + 2hu_{12}'; & u_{12}' &= -c_2 v_{12} C_x \left( \frac{v_{12}}{a_c} \right); & u_{21}' &= -c_2 v_{21} C_x \left( \frac{v_{21}}{a_c} \right); \\ \gamma_{21} &= \gamma_n - \frac{2hg}{u_{12}^2}; & v_{12} &= u_{12} \sqrt{1 + \gamma_{12}^2}; & v_{21} &= u_{21} \sqrt{1 + \gamma_{21}^2}; \\ y_{21} &= y_n + 2h\gamma_{12}; & & & & \end{aligned} \right\}$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_{n+2} &= u_n + \frac{h}{3}(u_n' + 2u_{11}' + 2u_{12}' + u_{21}'); \\ \gamma_{n+2} &= \gamma_n - \frac{hg}{3} \left( \frac{1}{u_n^2} + \frac{2}{u_{11}^2} + \frac{2}{u_{12}^2} + \frac{1}{u_{21}^2} \right); \\ y_{n+2} &= y_n + \frac{h}{3}(\gamma_n + 2\gamma_{11} + 2\gamma_{12} + \gamma_{21}); \\ t_{n+2} &= t_n + \frac{h}{3} \left( \frac{1}{u_n} + \frac{2}{u_{11}} + \frac{2}{u_{12}} + \frac{1}{u_{21}} \right). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Для осуществления перехода к методу Мильна необходимо определить несколько промежуточных величин:

$$\begin{aligned} u_1' &= \frac{1}{2}(u_{11}' + u_{12}'); & u_1 &= u_0 + \frac{h}{12}(5u_0' + 8u_1' - u_2'); \\ \gamma_1 &= \gamma_0 - \frac{gh}{12} \left( \frac{5}{u_0^2} + \frac{8}{u_1^2} - \frac{1}{u_2^2} \right); & y_1 &= \frac{h}{12}(5\gamma_0' + 8\gamma_1' - \gamma_2'); \\ t_1 &= \frac{h}{12} \left( \frac{5}{u_0} + \frac{8}{u_1} - \frac{1}{u_2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

И осуществляется переход к циклу интегрирования Мильна:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{n1} = u_{n-3} + \frac{3h}{4}(u_{n-3}' + 3u_{n-1}'); \\ \gamma_n = \gamma_{n-2} - \frac{gh}{3} \left( \frac{1}{u_{n-2}^2} + \frac{4}{u_{n-1}^2} + \frac{1}{u_{n1}^2} \right); \\ y_n = y_{n-2} + \frac{h}{3}(\gamma_{n-2} + 4\gamma_{n-1} + \gamma_n); \\ t_n = t_{n-2} + \frac{h}{3} \left( \frac{1}{u_{n-2}} + \frac{4}{u_{n-1}} + \frac{1}{u_{n1}} \right); \\ v_n = u_{n1} \sqrt{1 + \gamma_n^2}; \\ u_n' = -c_2 v_{n1} C_x \left( \frac{v_{n1}}{a_c} \right); \\ u_n = u_{n-2} + \frac{h}{3}(u_{n-2}' + 4u_{n-1}' + u_n'). \end{array} \right. \quad (8)$$

ПО стрелковой баллистики калибра 5,45 разработано в системе программирования Borland Delphi 5.0 на проблемно-ориентированном языке программирования Object Pascal и является частью ПО тренажера (точнее ПО ИМО – имитатора мишенной обстановки).

#### Алгоритм работы ПО внешней баллистики

Алгоритм ПО траектории внешней баллистики:

1. Инициализируются основные переменные с учетом типа ИО и характеристик боеприпаса из табл. 4:  $v_0$  и  $c$  (начальная скорость и баллистический коэффициент) и  $\theta$  (угол бросания по показаниям прицела: 1–10).

2. Исходные переменные корректируются по метеоусловиям:  $T$  – температура воздуха и  $p$  – давление воздуха по (2).

3. Осуществляется численное интегрирование (3) по первым трем шагам баллистической траектории методом Рунге – Кутты по дальности  $x$  с шагом  $h$  по (5, 6).

4. Вычисляются промежуточные переменные по (7).

5. Продолжается численное интегрирование баллистической траектории более эффективным методом Мильна по дальности  $x$  с шагом  $h$  в цикле 5-6 по (8), при этом можно сразу выполнить несколько шагов по  $h$  до полного шага в 1 м (в дальнейшем параметры между такими шагами линейно интерполируются для решения «задачи встречи»).

6. Полученные переменные  $x$ ,  $y$ ,  $t$ ,  $v$  корректируются по (4) и используются для учета

отклонения от бокового ветра (вводится координата  $z$ ), отрисовки трассиров (видимых следов трассирующих пуль по траектории), решения «задача встречи» с препятствиями: целями, местными предметами, рельефом (подробно рассматривается в следующих статьях).

7. Цикл заканчивается при достижении дальности  $x$  2000 м или возвышения  $y$  минус 50 м (ниже уровня рельефа).

Анализ алгоритма показал, что он синхронный (время полета пули до определенной дальности вычисляется по математической модели, а значит, прогнозируемо), поэтому для реализации его в реальном времени для каждого выстрела создается программный объект Tshot, который синхронизирует анализ текущей позиции пули с дальнейшим просчетом траектории по шагам, не занимая излишнего процессорного времени (особенно вследствие внутреннего цикла по шагам до 1 м) и не мешая просчету других выстрелов и прорисовке изменяющейся мишенной обстановки и спецэффектов [33].

#### Испытания ПО баллистики

При испытании ПО баллистики калибра 5,45 тренажера проводилась проверка возвышения баллистической траектории в моделирующей программе на рассогласование с табличными значениями (табл. 1-3) из наставления на АК-74 и РПК-74 [34]. Таблицы составлены для «стандартных погодных» условий (+15 °С тепла, давление 760 мм рт. ст.) и не отличаются высокой точностью: имеют так называемую погрешность последней значащей цифры важных данных  $\pm 0,005$  с,  $\pm 0,5''$  и от  $\pm 0,5$  см до  $\pm 5$  см.

Погрешности - рассогласования координат ( $y - y_0$ ) - генерируемой ПО баллистики траектории представлены в табл. 6-7 для дальности до 500 м с шагом 50 м и оказались в пределах допуска из ТТЗ в 0,3 т.д. Анализ показал, что все рассогласования до ТП идут в сторону возвышения траектории, при этом на восходящей части траектории погрешность выше, чем на нисходящей.

В табл. 8 показаны рассогласования возвышения траектории от атмосферных факторов ( $T$  для АК-74 и  $p$  для РПК-74) по значениям табл. 3. Также погрешность моделирования находится в рамках требований ТТЗ, хотя на больших дальностях в сильный мороз траектория заваливается сильнее.

В табл. 9 показан выбор оптимального по соотношению «быстродействие/точность» шага интегрирования математической модели  $h=0,20$  м.

Таблица 6. Погрешность моделирования траектории АК-74 от дальности

Дальность \ Прицел	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	Сантиметры рассогласования ( $y - y_0$ ) с табл. 1											
1	+1,72	+0,02	-2,5	-5,4								
2	+2,6	+2,7	+6,0	-0,03	-1,1	-2,7						
3	+4,2	+3,9	+2,9	+2,5	+1,1	+0,04	-1,5	-1,5				
4	+4,75	+4,1	+3,6	+2,7	+2,85	+1,35	+0,36	-0,07	-2,1	-3,2		
5	+4,6	+4,8	+4,1	+4,0	+4,0	+3,6	+3,2	+2,6	+2,4	+0,12	-1,8	-3,5

Таблица 7. Погрешность моделирования траектории РПК-74 от дальности

Дальность \ Прицел	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	Сантиметры рассогласования ( $y - y_0$ ) с табл. 2											
1	+1,5	+0,01	-2,8	-5,5								
2	+1,5	+2,7	+1,3	+0,0	-1,7	-2,9						
3	-0,13	+3,7	+2,3	+2,0	+1,5	+0,06	-1,9	-2,1				
4	+2,6	+4,3	+3,6	+3,1	+2,3	+1,7	+1,5	+0,1	-1,6	-4,6		
5	+4,4	+4,8	+3,9	+4,2	+3,2	+3,3	+0,0	+2,3	+1,3	+0,05	+0,1	+0,9

Таблица 8. Погрешность моделирования траектории АК-74 и РПК-74 от атмосферы

Дальность	Сантиметры рассогласования ( $y - y_0$ ) с табл. 3						
	АК-74				РПК-74		
	$T = 25^\circ\text{C}$	$T = -5^\circ\text{C}$	$T = -15^\circ\text{C}$	$T = -25^\circ\text{C}$	$p = 740$ мм рт. ст.	$p = 720$ мм рт. ст.	$p = 780$ мм рт. ст.
400	-0,7	+0,4	+0,2	-0,32	-0,8	-1,6	+0,7
500	-0,9	+0,5	-0,3	-1,9	-1,1	-2,2	+1,1
600	-2,8	+1,9	+0,5	-2,8	+0,2	+0,02	-0,1
700	-4,4	+1,2	-3,1	-13,5	-0,2	-0,9	-0,2
800	+2,4	-0,24	-7,9	-22,6	-0,6	-2,0	-0,2

Таблица 9. Выбор шага интегрирования математической модели баллистики

Шаг интегрирования, см \ Отклонения (допуск 0,01 см)	100	50	33,3	25	20	16,7	14,4	12,5
Абсолютные, см	0,108	0,053	0,017	0,010	<b>0,006</b>	0,004	0,004	-
Относительные, %	100	49,1	15,7	0,009	<b>0,0056</b>	0,0037	0,0037	-
Значения в ТП, см	0,721	0,829	0,862	0,879	0,889	0,895	0,899	0,903
Время на 1 м дистанции, %	100	200	300	400	500	600	700	800

Таким образом, математическая модель внешней баллистики, теоретически обоснованная в [35, 36], с авторским методом подбора параметров, получила практическую апробацию в вопросах зависимости от температуры и давления воздуха и показала свою адекватность.

### Выводы

Анализ ПО тренажера для поддержки баллистики ИО калибра 5,45 показал:

1. ПО баллистики, учитывая начальные параметры выстрела (показания прицела), параметры боеприпаса (начальную скорость и баллистический коэффициент) и метеословия (температуру и давление воздуха), просчитывает баллистическую траекторию в реальном

масштабе времени, что позволяет добиться реалистичности и требуемых точности и быстродействия благодаря реализованному алгоритму решения дифференциальной математической модели.

2. Испытания ПО баллистики на погрешность имитации возвышения баллистической кривой и зависимость от температуры и давления воздуха показали соответствие требованиям ТТЗ и прошли военную приемку.

Таким образом, показана актуальность дальнейшего исследования и использования электронных стрелковых тренажеров, особенно благодаря высокой эффективности и гибкости программного обеспечения, позволяющих повысить реалистичность имитации внешней



баллистики оружия, а также благодаря окупаемости и безопасности тренажеров в подготовке личного состава.

### Библиографические ссылки

1. *Muñoz J.E., Pope A.T., Velez L.E.* Integrating Biocybernetic Adaptation in Virtual Reality Training Concentration and Calmness in Target Shooting // *Physiological Computing Systems. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10057. 2019. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12).

2. *Lábr M., Hagara L.* Using open source on multiparametric measuring system of shooting // *ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies*. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870093.

3. *Bogatinov D., Lameski P., Trajkovic V.* Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor // *MULTIMEDIA TOOLS AND APPLICATIONS*. 2017, vol. 76, no. 1, pp. 1403-1418. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3118-z>.

4. *Gudzbeler G., Struniawski J.* Functional assumptions of "Virtual system to improve shooting training and intervention tactics of services responsible for security" (VirtPol) // *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, POLAND)*. 2017, vol. 10445, no. UNSP 104456M. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2281622>.

5. *Gudzbeler G., Struniawski J.* Methodology of shooting training using modern IT techniques // *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, POLAND)*. 2017, vol. 10445, no. UNSP 104456L. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2281618>.

6. *Fan YC., Wen CY.* A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training // *SENSORS*. 2019, vol. 19, no. 451. DOI: 10.3390/s19030451.

7. *de Armas C., Tori R., Netto A. V.* Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review // *Multimed Tools Appl*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>.

8. *Fedaravičius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survila A.* Research and development of training pistols for laser shooting simulation system // *Defence Technology*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.018>.

9. *Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N.* Optoelectronic tracking system for shooting simulator - tests in a virtual reality application // *PHOTONICS LETTERS OF POLAND*. 2020, vol. 12, no. 2, pp. 61-63. DOI: 10.4302/plp.v12i2.1025.

10. *Taylor P.* Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force // *POLICE QUARTERLY*. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 311-332. DOI: 10.1177/1098611119896653.

11. *Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N.* Design and Evaluation of a SteamVR Tracker for Training Applications – Simulations and Measure-

ments // *METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS*. 2020, vol. 27, no. 4, pp. 601-614. DOI: 10.24425/mms.2020.134841.

12. *Aphanasiev V. A., Yuran S. I.* Determination of point estimates in an information measuring system on the basis of light shields // *Journal of Measurements in Engineering*. 2019. Т. 7. № 2. С. 90-95. DOI: 10.21595/jme.2019.20442.

13. *Afanasyev V. A., Mayshev A. E., Anisimov K. Y.* Elaboration of mathematical model of flight trajectory of material point in atmosphere // *Vibroengineering Procedia 33, Vibration and Acoustics: Challenges in Mechanical Engineering. Ser. "33rd International Conference on Vibroengineering"* 2018. С. 246-251. DOI: 10.21595/vp.2018.20121.

14. *Афанасьев В. А., Коробейникова И. В.* Модели акустических мишеней для сверхзвуковых и дозвуковых скоростей движения пуль // *Системная инженерия*. 2015. № 1 (1). С. 53–64.

15. *Коробейников В. В., Коробейникова И. В.* Варианты моделей акустических мишеней // *Вестник КИГИТ*. 2012. № 1 (19). С. 18–23.

16. *Алексеев С. А.* Системные методы исследования конструкций стрелкового оружия // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2020. Т. 23, № 3. С. 5–14. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-5-14.

17. Технологические особенности сборки и испытания модульного оружия / С. А. Писарев, Р. В. Минибаев, Д. С. Романов, И. В. Токарев // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2019. Т. 22, № 3. С. 42–47. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-42-47.

18. К вопросу возможности применения модульной конструкции оружия с перспективным патроном / С. А. Писарев, Р. В. Минибаев, Д. С. Романов, И. В. Токарев, Л. А. Фитилев // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2019. Т. 22, № 2. С. 33–38. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-33-38.

19. *Петухов К. Ю.* Алгоритмы обработки сигналов при цифровых измерениях в информационно-измерительных системах для стрелкового оружия : дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2003. 156 с.

20. *Петухов К. Ю.* Автоматизация измерения скорости детали в момент встречи с упором // *Вестник КИГИТ*. 2010. № 1 (10). С. 116–117.

21. *Петухов К. Ю., Шаяхметов М. Р.* Передискретизация как метод борьбы с шумом // *Вестник КИГИТ*. 2012. № 7 (25). С. 4–8.

22. *Петухов К. Ю.* Алгоритмы обработки цифровых измерений, эквивалентных преобразованиям аналоговых сигналов // *Вестник КИГИТ*. 2010. № 1 (10). С. 118–121.

23. *Корнилов И. Г., Афанасьева Н. Ю., Веркиенко Ю. В.* Обратная модель системы «проектор – экран – оптико-электронный преобразователь» стрелкового тренажера // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2007. № 1. С. 63–65.

24. *Корнилов И. Г.* Измерительно-вычислительная система определения точки попадания в стрелковом тренажере коллективного боя // *Вестник*

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2012. № 2. С. 110–113.

25. Егоров С. Ф., Казаков В. С. История создания оптико-электронного стрелкового тренажера «Ингибитор» // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб-к трудов регион. науч.-техн. очно-заочной конф. / науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск, 2016. С. 134–142.

26. Оптико-электронные стрелковые тренажеры. Теория и практика / В. С. Казаков, Ю. В. Веркиенко, В. В. Коробейников, Н. Ю. Афанасьева. Ижевск : ИПМ УрО РАН, 2007. 260 с.

27. Исследование оптико-электронных регистраторов точки прицеливания стрелковых тренажеров / С. Ф. Егоров, Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов, С. Р. Кизнерцев, А. А. Метелева // Проблемы механики и материаловедения. Труды Института механики УрО РАН. Ижевск, 2017. С. 227–248.

28. Ермолаев С. И., Комаров Л. Б., Чурбанов Е. В. Внешняя баллистика. Л., 1958. 716 с.

29. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. Ижевск. 2003. 192 с.

30. Исследование уравнений внешней баллистики для решения обратной задачи / В. А. Афанасьев, Н. Ю. Афанасьева, А. Ю. Вдовин, Ю. В. Веркиенко // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2008. № 4. С. 105–107.

31. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. М. : ЦНИИ информации, 1979. – 228 с.

32. Смирнов А. А. Разработка методики и алгоритмов имитации местности и мишенной обстановки в стрелковых тренажерах : дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2001. 148 с.

33. Там же.

34. Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5.45 и 7.62 мм. М. : оениздат, 1977. 264 с.

35. Ермолаев С. И., Комаров Л. Б., Чурбанов Е. В. Внешняя баллистика. Л., 1958. 716 с.

36. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. Ижевск. 2003. – 192 с.

## References

1. Muñoz J.E., Pope A.T., Velez L.E. Integrating Biocybernetic Adaptation in Virtual Reality Training Concentration and Calmness in Target Shooting. *Physiological Computing Systems. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10057. 2019. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12).

2. Lábr M., Hagara L. Using open source on multi-parametric measuring system of shooting. *ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies*. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870093.

3. Bogatinov D., Lameski P., Trajkovic V. Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor. *MULTIMEDIA TOOLS AND APPLICATIONS*. 2017, vol. 76, no. 1, pp. 1403-1418. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3118-z>.

4. Gudzbeler G., Struniawski J. Functional assumptions of "Virtual system to improve shooting training

and intervention tactics of services responsible for security" (VirtPol). *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, POLAND)*. 2017, vol. 10445, no. UNSP 104456M. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2281622>.

5. Gudzbeler G., Struniawski J. Methodology of shooting training using modern IT techniques. *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, POLAND)*. 2017, vol. 10445, no. UNSP 104456L. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2281618>.

6. Fan YC., Wen CY. A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training. *SENSORS*. 2019, vol. 19, no. 451. DOI: 10.3390/s19030451.

7. de Armas C., Tori R., Netto A. V. Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review. *Multimed Tools Appl*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>.

8. Fedaravičius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survila A. Research and development of training pistols for laser shooting simulation system. *Defence Technology*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.018>.

9. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek, M., Palka N. Optoelectronic tracking system for shooting simulator – tests in a virtual reality application. *PHOTONICS LETTERS OF POLAND*. 2020, vol. 12, no. 2, pp. 61-63. DOI: 10.4302/plp.v12i2.1025.

10. Taylor P. Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force. *POLICE QUARTERLY*. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 311-332 (1098611119896653). DOI: 10.1177/1098611119896653.

11. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Design and Evaluation of a SteamVR Tracker for Training Applications – Simulations and Measurements. *METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS*. 2020, vol. 27, no. 4, pp. 601-614. DOI: 10.24425/mms.2020.134841.

12. Aphanasiev V. A., Yuran S. I. Determination of point estimates in an information measuring system on the basic of light shields. *Journal of Measurements in Engineering*. 2019. Vol. 7. No 2. Pp. 90-95. DOI: 10.21595/jme.2019.20442.

13. Afanasyev V. A., Mayshev A. E., Anisimov K. Y. Elaboration of mathematical model of flight trajectory of material point in atmosphere. *Vibroengineering Procedia 33, Vibration and Acoustics: Challenges in Mechanical Engineering. Cep. "33rd International Conference on Vibroengineering"* 2018. Pp. 246-251. DOI: 10.21595/vp.2018.20121.

14. Afanas'ev V.A., Korobeinikova I.V. *Modeli akusticheskikh mishenei dlya sverkhzvukovykh i dozvukovykh skorostei dvizheniya pul'* [Acoustic target models for supersonic and subsonic bullet speeds]. *Sistemnaya inzheneriya*. 2015, no. 1, pp. 53-64 (in Russ.).

15. Korobeynikov V.V., Korobeynikova I.V. *Varianty modelei akusticheskikh mishenei* [Acoustic Target Model Options]. *Vestnik KIGIT*, 2012, no. 1, pp. 18-23 (in Russ.).

16. Alekseev S. A. *Sistemnye metody issledovaniya konstruksii strelkovogo oruzhiya* [System Methods of Research of Small Arms Designs]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 5-14 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-5-14.
17. Pisarev S.A., Minibaev R.V., Romanov D.S., Tokarev I.V. *Tekhnologicheskie osobennosti sborki i ispytaniya modul'nogo oruzhiya* [Technological features of assembly and testing of modular weapons]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 42-47 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-42-47.
18. Pisarev S.A., Minibaev R.V., Romanov D.S., Tokarev I.V., Fitilev L.A. *K voprosu vozmozhnosti primeneniya modul'noi konstruksii oruzhiya s perspektivnym patronom* [On the question of the possibility of using a modular design of weapons with a perspective cartridge]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 33-38 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-33-38.
19. Petukhov K.Yu. *Algoritmy obrabotki signalov pri tsifrovyykh izmereniyakh v informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh dlya strelkovogo oruzhiya* [Algorithms of signal processing at digital measurements in information-measuring systems for small arms]: PhD thesis. Izhevsk, 2003, 156 p. (in Russ.).
20. Petukhov K.Yu. *Avtomatizatsiya izmereniya skorosti detali v moment vstrechi s uporum* [Automation of part speed measurement at the moment of meeting with stop]. *Vestnik KIGIT*. 2010, no. 1, pp. 116-117 (in Russ.).
21. Petukhov K.Yu., Shayakhmetov M.R. *Perediskretizatsiya kak metod bor'by s shumom* [Reexamination as a noise control method]. *Vestnik KIGIT*. 2012, no. 7, pp. 4-8 (in Russ.).
22. Petukhov K.Yu. *Algoritmy obrabotki tsifrovyykh izmerenii, ekvivalentnykh preobrazovaniyam analogovykh signalov* [Algorithms for processing digital measurements equivalent to analog signal conversions]. *Vestnik KIGIT*. 2010, no. 1, pp. 118-121 (in Russ.).
23. Kornilov I.G., Afanas'eva N.Yu., Verkienko Yu.V. *Obratnaya model' sistemy «proektor – ekran – optiko-elektronnyi preobrazovatel'» strelkovogo trenazhera* [Reverse model of the system "projector - screen - optoelectronic converter-tel" rifle simulator]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2007, no. 1, pp. 63-65 (in Russ.).
24. Kornilov I.G. *Izmeritel'no-vychislitel'naya sistema opredeleniya tochki popadaniya v strelko-vom trenazhere kollektivnogo boya* [Measuring and computational system for determining the point of hit in the collective combat shooter]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2012, no. 2, pp. 110-113 (in Russ.).
25. Egorov S.F., Kazakov V.S. *Istoriya sozdaniya optiko-elektronnoy strelkovoy trenazhera «Ingibitor»* [History of creation of the optical-electronic shooting "Inhibitor" exercise machine]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii. Sbornik trudov reg-oi nauchno-tekhnicheskoi ochno-zaochnoi konf.* [Information technologies in science, the industry and education. Collection of works regional scientific and technical intramural and extramural conf.] (ed. Kulikov V.A.). Izhevsk, 2016, pp. 134-142 (in Russ.).
26. Kazakov V.S., Verkienko Yu.V., Korobeinikov V.V., Afanas'eva N.Yu. *Optiko-elektronnye strelkovye trenazhery. Teoriya i praktika* [Optical-electronic shooting exercise machines. Theory and practice]. Izhevsk, Institute of mechanics UB RAS, 2007, 260 p. (in Russ.).
27. Egorov S.F., Shelkovnikov Yu.K., Osipov N.I., Kiznertsev S.R., Meteleva A.A. *Issledovanie optiko-elektronnykh registratorov tochki pritselivaniya strelkovykh trenazherov* [Research of optical-electronic registrars of an aiming mark of shooting exercise machines]. *Problemy mekhaniki i materialovedeniya. Trudy Instituta mekhaniki UrO RAN* [Problems of mechanics and materials science. Works of Institute of mechanics UB RAS]. Izhevsk, 2017, pp. 227-248 (in Russ.).
28. Ermolaev S.I., Komarov L.B., Churbanov E.V. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics] Leningrad, 1958, 716 p. (in Russ.).
29. Konovalov A. A., Nikolaev Yu. V. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics]. Izhevsk, 2003, 192 p. (in Russ.).
30. Afanas'ev V.A., Afanas'eva N.Yu., Vdovin A.Yu., Verkienko Yu.V. *Issledovanie uravnenii vneshnei ballistiki dlya resheniya obratnoi zadachi* [Study of external ballistics equations to solve the inverse problem]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2008, no. 4, pp. 105-107 (in Russ.).
31. Konovalov A. A., Nikolaev Yu. V. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics]. Moscow, 1979, 228 p. (in Russ.).
32. Smirnov A.A. *Razrabotka metodiki i algoritmov imitatsii mestnosti i mishennoi obstanovki v strelkovykh trenazherakh* [Development of a technique and algorithms of imitation of the area and target situation in shooting exercise machines]: PhD thesis. Izhevsk, 2001, 148 p. (in Russ.).
33. Ibid.
34. *Tablitsy strel'by po nazemnym tselyam iz strelkovogo oruzhiya kalibrov 5.45 i 7.62 mm.* [Tables of fire against ground targets from small arms of caliber 5.45 and 7.62 mm]. Moscow, 1977, 264 p. (in Russ.).
35. Ermolaev S.I., Komarov L.B., Churbanov E.V. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics]. Leningrad, 1958, 716 p. (in Russ.).
36. Konovalov A.A., Nikolaev Yu.V. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics]. Izhevsk, 2003, 192 p. (in Russ.).

\* \* \*

**Shooting Simulator «Inhibitor»: Ballistics Software for 5.45 Caliber Weapons**

S. F. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Scientific Associate, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

A. Yu. Vdovin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Yu. K. Shelkovnikov, DSc in Engineering, Professor, Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

*The paper describes the software for support of external ballistics calculation for weapons of 5.45 mm caliber taking into account external factors for the optical-electronic tactical exercise machine for small arms "Inhibitor" developed at the Institute of mechanics UdmFRC UB RAS and at the Computer facilities department of Kalashnikov ISTU jointly with with JSC «Kalashnikov» Concern».*

*Tactical and technical assignment is given for the ballistic calculation of the trajectory range up to 2 km of weapon simulators with a laser emitter of the targeting point taking into account external factors: positions of the aiming bar of all types of sights, temperature and air pressure, which have a significant impact on the air resistance. The implemented differential mathematical model of external ballistics relying on the aiming angle of the weapon simulator, the initial speed and ballistic coefficient of the ammunition in real time creates a ballistic trajectory with amendments to the air temperature and pressure. Results of software tests for the error of calculation of ballistic trajectory coordinates are given.*

*It was concluded that further research and development of electronic shooting simulators were promising due to the improvement and cheapening of the element base and the development of software libraries in order to increase the accuracy of simulating the external score of simulators taking into account many external factors, expanding functional capabilities and reducing cost and, therefore, increasing competitiveness.*

**Keywords:** shooting exercise machine (shooting simulator), external ballistics, mathematical model, theory of corrections, ballistics trajectory, integration.

Получено: 12.04.2021